高速铁路移动通信下基于 IMT-A 的时变信道建模 *

廖　勇 [1,2]，樊卓宸 [3]，沈轩帆 [1]，胡　异 [1]，姚海梅 [1]，张　楠 [1]

(1. 重庆大学 飞行器测控与通信教育部重点实验室，重庆 400044; 2. 西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室，西安 710071; 3. 北京大学信息工程学院，广东 深圳 518055)

摘　要：信道建模及其仿真方法是高速铁路移动通信系统设计的难点，同时已有的面向高速移动下 IMT-A 时变信道建模的研究仍存在不足。针对上述挑战，提出了一种高铁移动下具有时变参数的基于 IMT-A 信道的建模方法。首先，针对 IMT-A 的城市宏小区场景，设计了一个马尔可夫过程来模拟时变簇的数量变化，接着推导出随时间变化的信道参数的表达式，其中包括簇的延迟、功率、离开角和到达角，并得到了信道冲激响应；其次，分析了信道的时变空时域互相关函数、时变自相关函数以及平稳间隔；最后，对所提信道模型的统计性质进行了仿真，验证了该模型具有时变性以及高速铁路信道具有的非平稳性，并且证明了所提信道模型可用来模拟高速铁路信道的可行性。

关键词：高速移动；信道建模；时变参数；马尔可夫过程；非平稳性

中图分类号：TN918　　doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2017.08.0887

Time-varying IMT-A channel modeling for high-speed train mobile communication scenario

Liao Yong[1, 2], Fan Zhuochen[3], Shen Yuanfan[1], Hu Yi[1], Yao Haimei[1], Zhang Nan[1]

(1. *Key Laboratory of Aerocraft TT&C and Communication of Ministry of Education*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*; 2. *State Key Laboratory of Integrated Services Networks*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*; 3. *School of Electronic & Computer Engineering*, *Peking University Shenzhen Graduate School*, *Shenzhen Guangdong* 518055, *China*)

Abstract: Channel modeling and its simulation method is the difficult point of high-speed train mobile communication system design. At the same time, there are still some researches on IMT-A time-varying channel modeling for high-speed train mobile communication. Aiming at the above challenges, this paper presents a modeling method based on IMT-A channel with high-speed train mobile with time-varying parameters. First, for the urban macro-cell (UMA) scene of IMT-A, we design a Markov process to simulate the number of time-varying clusters, and then derive the expression of the channel parameters with time, including the delay, power, Angle and reach angle, and get the channel impulse response(CIR) . Secondly, the time-varying space-time cross-correlation function(CCF) , time-varying auto-correlation function(ACF) and stationary interval of channel are analyzed. Finally, the statistical properties of the proposed channel model are simulated, which proves the non-stationarity of the model and the non-stationarity of the high-speed train channel, and proves that the proposed channel model can be used to simulate the feasibility of high-speed train channel.

Key Words: high-speed train mobile communication; channel modeling; time-varying parameters; Markov process; non-stationarity

0　引言

近年来，随着高速铁路的发展，乘客对高质量、高速率的数据和多媒体通信提出了更高的需求。然而，现有的无线通信技术还无法满足运行速度在 300 km/h 以上列车的高质量的多媒体通信需求。众所周知，信道是通信系统的基础，它的模型及仿真方法对于特定场景下通信系统的设计具有重要作用。当前面向高铁场景的标准化信道模型主要有 IMT-advanced(IMT-A)[1]和 WINNER II 信道模型，它们均假设信道满足广义稳定(wide-sense stationary, WSS)并且忽略了其非平稳性。文献[2]中

基金项目：国家自然科学基金资助项目（61501066）；重庆市基础与前沿研究计划项目（cstc2015jcyjA40003）；西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室开放基金资助项目（ISN16-03）；中央高校基本科研业务费基金资助项目（106112017CDJXY500001）

作者简介：廖勇（1982-），男，四川自贡人，副研究员，博士，主要研究方向为高速移动通信、飞行器测控与通信（liaoy@cqu.edu.cn）；樊卓宸（1993-），男，广东珠海人，硕士研究生，主要研究方向为信号处理；沈轩帆（1994-），男，云南昆明人，硕士研究生，主要研究方向为高速移动通信中的信道估计；胡异（1994-），女，重庆人，硕士研究生，主要研究方向为高速移动通信中的预编码技术；姚海梅（1992-），女，江西吉安人，硕士研究生，主要研究方向为人工智能及其在无线通信中的应用；张楠（1995-），女，四川富顺人，硕士研究生，主要研究方向为高速移动通信中的信道估计.

信道测量的结果表明，标准信道模型明显比实际测量的高速铁路信道具有更长的平稳间隔（定义为信道满足 WSS 条件的最大持续时间），而 WSS 假设仅对实际无线信道中的短时间间隔有效。综上所述，采用常规平稳信道来建模高速铁路信道的方法已经受到日益严峻的挑战。

目前，国内外针对高铁移动通信场景下的信道建模已做了大量研究，特别是针对非几何随机模型(non-geometrical stochastic model, NGSM)。文献[3]提出了一种基于高铁无线通信的有限状态马尔可夫链的 NGSM，使用马尔可夫链来表征移动簇(moving clusters, MC)的生灭性质。所提模型能够利用马尔可夫链在不同的接收信噪比区间跟踪信道状态的变化，从而捕获高铁无线信道随时间变化的特性。但是，该模型的非平稳的统计性质很难通过推导得出。此外，文献[4]提出了基于 NGSM 的非平稳车对车信道。基于在高架桥和狭窄通道场景下的高铁信道测量数据，文献[5]提出了一种有限状态的马尔可夫信道，结果表明，莱斯分布能很好地表征小尺度衰落在两种高铁场景下的测量幅度，并且 NGSM 可有效地捕捉在高铁信道中快衰落的动态本质。但是在现有 NGSM 的研究方法中，目前尚没有面向 IMT-A 时变信道的建模，因此，为了健全和完善高速铁路无线信道建模理论，研究这类符合高速铁路移动通信情形下的信道建模方法具有一定的应用参考价值。

为此，本文提出了一种高铁移动通信 NGSM 场景下具有时变参数的基于 IMT-A 的信道建模方法，其中时变参数包括簇的数量、功率和延迟，以及离开角(angle of departure, AoD)和到达角(angles of arrival, AoA)。首先本文理论分析了所提模型重要的统计特性，包括局部空间互相关函数(cross-correlation function, CCF)、局部时间自相关函数(auto-correlation function, ACF)和平稳间隔。其次，通过 MATLAB 仿真验证了该信道模型具有非平稳性，从而证明了理论分析和推导的正确性。

1　基于 IMT-A 的信道建模

在高速移动的环境下，可观察到的 MC 或移动端(Mobile Station, MS)的快速移动，这样的移动变化可能会违背前面所提到的 WSS 假设。在这种情况下提出具有时变参数的基于 IMT-A 信道建模，几何示意图如图 1 所示，其信道冲激响应(channel impulse respond, CIR)可以表示为

$$h(t,\tau)=\sum_{p=1}^{P(t)} h_p(t)\delta\left(\tau-\tau_p(t)\right) \tag{1}$$

其中:

$$h_p(t)=\sqrt{W_p(t)/Q}\times \sum_{q=1}^{Q} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta_T k\sin(\alpha_{pq}^T(t))+\mathrm{j}\delta_R k\sin(\alpha_{pq}^R(t))}\times \mathrm{e}^{\mathrm{j}k\|\vec{v}_{MS}\|\cos(\alpha_{pq}^R(t)-\alpha_{MS})t}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Theta_{pq}} \tag{2}$$

由于 MS 和/或 MC 的移动，信道模型参数 $P(t)$，$\tau_p(t)$，$W_p(t)$，$\alpha_{pq}^T(t)$ 和 $\alpha_{pq}^R(t)$ 需要使用适当的时变函数来表示。其中 $\alpha_{pq}^T(t_0)$，$\alpha_{pq}^R(t_0)$，$\Delta\alpha_{pq}^T(t)$ 和 $\Delta\alpha_{pq}^R(t)$ 分别表示初始 AoD，初始 AoA，AoD 偏移和 AoA 偏移。下标 p，q 分别表示宽带信道中的 P 条路径中的一条和 Q 条子路径中的一条。此时的 AoD 和第一单射/簇 S_1 有关，AoA 来自最后的单射/簇 S_P。此外，α_{LOS}^T 和 α_{LOS}^R 分别是基站(Base Station, BS)和 MS 的视距(Line of Sight, LoS)分量。本文假设 BS 是固定的，而簇 S_1，以 α_1 的方向和速度 v_1 运动。当本文考虑对于每个路径发生多次散射时，簇 S_P 表示具有移动方向 α_P 和速度 v_P 的最后一次反射。对于 MS，α_{MS} 是具有速度 v_{MS} 的移动方向。 MC S_1，MC S_P 和 MS 的移动分别使用向量 $\vec{v}_1$，$\vec{v}_P$ 和 $\vec{v}_{MS}$ 表示在图中。此外，假设 BS 和 MC S_1 之间的初始距离 $D_{BS}^T(t_0)$ 以及 MS 和 MC S_P 之间的初始距离 $D_{MS}^R(t_0)$ 是已知的。BS 和 MS 之间的 LoS 分量的初始距离为 $D_{LOS}(t_0)$。信道参数及定义通过表 1 给出。

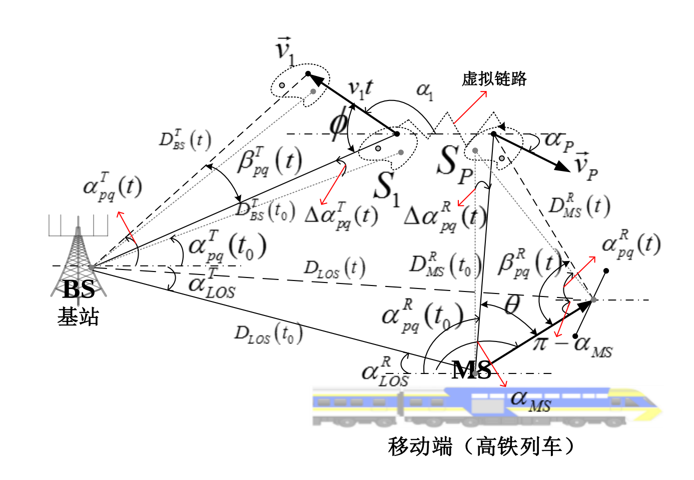


图 1 基于 IMT-A 信道建模的时变参数示意图

基于 MC S_1，MC S_P 和 MS 的移动方向，BS，MC 和 MS 之间的距离将随着时间 t 变化。通过考虑相对速度 MC S_1 和 MC S_P 的概念，本文可以假定 MS 只相对于 MC S_P 的运动。从信道测量获得距离 $D_{BS}^T(t_0)$、$D_{MS}^R(t_0)$ 和 $D_{LOS}(t_0)$ 后，则时间 t 处的时变距离可以表示为式(3)、(4)和(5)。图 1 中信道参数的定义如表 1 所示。

表 1　图 1 中信道参数的定义

参数	定义
$D_{BS}^T(t)$	BS 和 MC S_1 之间的距离
$D_{MS}^R(t)$	MS 和 MC S_P 之间的距离
$D_{LOS}(t)$	BS 和 MS 之间 LoS 分量的距离
$\alpha_{pq}^T(t)$，$\alpha_{pq}^R(t)$	与第 p 个簇/路径内的第 q 个子路径相关的 AoD 和 AoA
α_{LOS}^T，α_{LOS}^R	LoS AoD 和 LoS AoA
$\Delta\alpha_{pq}^T(t)$，$\Delta\alpha_{pq}^R(t)$	AoD 偏移和 AoA 偏移
$\vec{v}_1$，$\vec{v}_P$ 和 $\vec{v}_{MS}$	MC S_1，MC S_P 和 MS 的速度矢量
v_1，α_1	MC A 的速度和 MS 的移动方向
v_P，α_P	MC Z 的速度和 MS 的移动方向
v_{MS}，α_{MS}	MS 的速度和 MS 的移动方向

$$D^T_{BS}(t)=\sqrt{\left(D^T_{BS}(t_0)\right)^2+(v_1t)^2-2\cdot D^T_{BS}(t_0)\cdot v_1t\cdot\cos(\pi+\alpha^T_{pq}(t_0))-\alpha_A)} \tag{3}$$

$$D^R_{MS}(t)=\sqrt{\left(D^R_{MS}(t_0)\right)^2+(vt)^2-2\cdot D^R_{MS}(t_0)\cdot vt\cdot\cos(\alpha^R_{pq}(t_0)-\alpha_v)} \tag{4}$$

$$D_{LOS}(t)=\sqrt{D^2_{LOS}(t_0)+(v_{MS}t)^2-2\cdot D_{LOS}(t_0)\cdot v_{MS}t\cdot\cos(\alpha_{MS}-\alpha^R_{LOS})} \tag{5}$$

为了推导出所需求解的时变角参数，本文设置四个辅助角，即图中的 $\beta^T_{pq}(t)$，ϕ，$\beta^R_{pq}(t)$ 和 θ。应当注意，在图中，仅展示出了 LoS 路径和第 p 个散射传播路径。作为示例，簇 S_1 和簇 S_P 分别对应于第 p 个散射路径的第一和最后的跳动簇。如果 MC S_1 和/或 MC S_P 是平稳的，则 MC S_1 的速度 v_1 或 MC S_P 的速度 v_P 可以被设置为零。这不会影响该基于 IMT-A 的信道建模中的时变信道参数的生成过程。

基于上述描述，可以通过以下步骤获得基于 IMT-A 信道建模中的信道参数的实现，如图 2 所示：

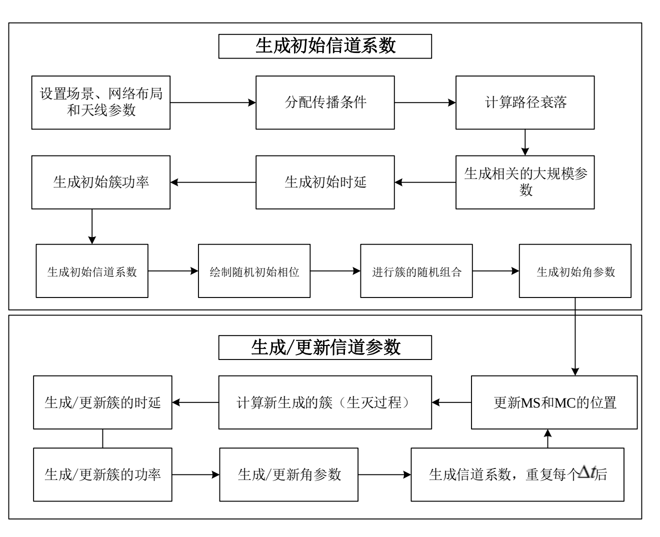


图 2 基于 IMT-A 信道建模的信道参数实现流程图

2　时变信道参数分析

2.1　时变簇的生成

在高速铁路移动通信场境下，随着 MS 的移动，MS 和 BS 之间的传播环境将改变。此外，还有一些移动散射体在环境内的移动也会对传播环境造成影响。因此，在行驶过程中，一些路径会消失，同时一些新的路径会出现。文献[6]提出了生灭过程的移动簇的建模方法。在时变情况下，簇只考虑在特定时间段上存在。随着时间的推移，新的簇出现即出生，并且保持一定的时间即存活，然后最终消失即死亡。应当注意的是，时变簇是指本文假设此高铁信道是一个多径信道，但与传统信道不同的是，这个多径信道的径数 P 会随着时间变化，并且其状态转移连续，这就符合马尔可夫过程的连续状态转移的行为。所以，基于簇生成和重组的过程，$MC(\varepsilon_{MC})$ 的移动以及在 t_{k-1} 和 t_k 时刻的时间间隔中 $MC(\varepsilon_{MC})$ 的移动引起的信道波动可以表示为

$$\varepsilon_R=\varepsilon_{MC}+\varepsilon_{MS} \tag{6}$$

其中:
$$\varepsilon_{MC}=\int_{t_{k-1}}^{t_k}R_{MC}\left(\|\vec{v}_1\|+\|\vec{v}_P\|\right)\mathrm{d}t \tag{7}$$

$$\varepsilon_{MS}=\int_{t_{k-1}}^{t_k}\left(\|\vec{v}_{MS}\|\right)\mathrm{d}t \tag{8}$$

其中: R_{MC} 是移动簇所占的百分比。由于时间间隔较短暂，每个时间间隔 t_k-t_{k-1} 可以被假设为匀速运动[7]。这使得(7)和(8)得到进一步简化

$$\varepsilon_{MC}=(t_k-t_{k-1})R_{MC}(v_1+v_P) \tag{9}$$

$$\varepsilon_{MS}=(t_k-t_{k-1})v_{MS} \tag{10}$$

在任何 t_k 时刻可以通过在 t_{k-1} 时刻区分在先前 CIR 中已经存在的新生成的簇和存活的簇。通过簇的生成速率 ρ_1 和新路径的复合速率 ρ_2 来描述这个马尔可夫过程。CIR 实现中的簇的总数的期望也被定义为初始数，可表示为

$$\mathrm{E}\{P(t)\}=P(t_0)=\frac{\rho_1}{\rho_2} \tag{11}$$

观察这个 CIR 的时间序列，每个簇从 t_{k-1} 时刻的一个 CIR 到 t_k 时刻的随后的 CIR 保持概率为

$$R(\varepsilon_R)=\mathrm{e}^{-\rho_1\rho_2} \tag{12}$$

因此，通过马尔可夫过程产生的多个新簇的期望为

$$\mathrm{E}\{P_{new}\}=\frac{\rho_1}{\rho_2}\left(1-\mathrm{e}^{-\rho_1\rho_2}\right) \tag{13}$$

经过演化后，两个簇之间的相关性通过 ε_R 量化。若 ε_R 的值较高，则会导致 t_{k-1} 时刻的祖先簇的属性与其在 t_k 时刻的继承簇之间的相关性降低。在 NLoS 的城市宏小区(Urban Macro-cell, UMA)场景下，从原始 IMT-A 信道模型获取的初始簇数 $P(t_0)=18$，并且簇的每次改变只考虑在相邻状态的值之间改变。基于上述情况，本文进行马尔可夫生灭过程的 MATLAB 仿真，仿真数据为：$\rho_1=0.6/\mathrm{m}$，$\rho_2=0.03/\mathrm{m}$，$v_{MS}=60\mathrm{m/s}$，$v_1=15\mathrm{m/s}$，$v_P=5\mathrm{m/s}$，$R_{MC}=0.3$。仿真得到的时变簇的数量 $P(t)$ 如图 3 所示。

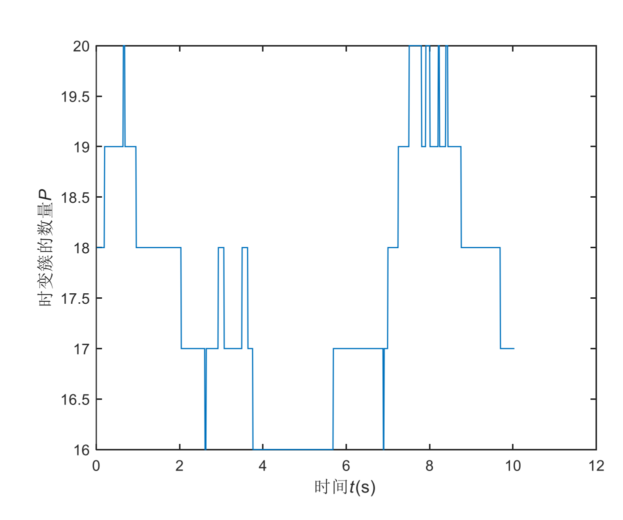


图 3　时变簇的数量分布

从图 3 中可以看出，簇的初始值为 18，簇的数量会随着时间而发生改变，并且一共有 16、17、18、19、20 这 5 种情况的数值。

2.2　时变延迟

随着 MC（包括 MC　S_1 和 MC　S_P）和 MS 的移动，第 p 个簇的传播距离将是时变的。时变延迟 $\tau_p(t)$ 的计算如下：

$$\begin{aligned}\tau_p(t) &= \left(\Delta D_{BS}^T + \Delta D_{MS}^R\right)/c + \tau_p'(t) = \\ &\left(D_{BS}^T(t) - D_{BS}^T(t_0)\right)/c + \left(D_{MS}^R(t) - D_{MS}^R(t_0)\right)/c + \tau_p'(t)\end{aligned} \tag{14}$$

其中：c 是空气中的光速，$\left(\Delta D_{BS}^T + \Delta D_{MS}^R\right)$ 是由 MS 和 MC 的移动引起的传播距离的改变。$\Delta D_{BS}^T = D_{BS}^T(t) - D_{BS}^T(t_0)$ 是 BS 和 MC　S_1 之间的距离差，$\Delta D_{MS}^R = D_{MS}^R(t) - D_{MS}^R(t_0)$ 是 MC　S_P 和 MS 之间的距离差，$\tau_p'(t)$ 是 MC　S_1 和 MC　S_P 之间的虚拟链路[8]的延迟，可以通过在 $t = t_k$ 时刻使用一阶滤波算法计算得到[9]

$$\tau_p'(t_k) = e^{((t_{k-1}-t_k)/\kappa)}\tau_p'(t_{k-1}) + \left(1 - e^{((t_{k-1}-t_k)/\kappa)}\right)\Gamma \tag{15}$$

其中 Γ 服从 $U(D_{LOS}/c, \tau_{\max})$ 分布，κ 是取决于虚拟链路和场景的相干性的参数，$\tau_{\max}$ 是最大延迟并且可以从文献[1]获得，例如，$\tau_{\max}$=1885ns。

值得注意的是，$\tau_p'(t_0)$ 可以计算为

$$\tau_p'(t_0) = \tau_p(t_0) - \left(D_{BS}^T(t_0) + \Delta D_{MS}^R(t_0)\right)/c \tag{16}$$

其中初始延迟 $\tau_p(t_0)$ 从指数延迟分布中随机抽取，如在原始 IMT-A 信道模型中解释的给定情形[8]。将式(3)~(5)代入式(14)，获得在不同瞬时时间 t 的第 p 个簇的时变延迟即 $\tau_p(t)$。然后通过减去最小延迟来对延迟进行归一化并按照降序排序。其中，归一化延迟将用于时变信道系数生成(见式(1))，但不用于簇的生成。

2.3　簇的时变功率

在时间 t_0 的第 n 个簇的随机平均功率表示为 $W_p(t_0)$，它可以从原始 IMT-A 信道模型给出的参数产生[1]。因此，基于上面对时变延迟的计算，那么在时间 t 的第 p 个簇的随机平均功率可以表示为

$$W_p'(t) = \mathrm{e}^{\frac{(1-r_{DS})(\tau_p(t))}{r_{DS}\cdot\sigma_{DS}}} \times 10^{-\frac{\xi_p}{10}} \tag{17}$$

其中：r_{DS} 是延迟分布比例因子，σ_{DS} 是延迟扩展，ξ_n 是每簇阴影项（以 dB 为单位），它们都可以从文献[1]中的表 A1-7 中获得。令所有簇功率的总功率等于 1，簇的时变功率 $W_p(t)$ 可以表示如下：

$$W_p(t) = W_p'(t) / \sum_{p=1}^{P(t)} W_p'(t) \tag{18}$$

2.4　时变 AoD

时变 AoD 的时变函数 $\alpha_{pq}^T(t)$ 可表示为

a）如果

$-\pi \le \alpha_{pq}^T(t_0) < 0, -\pi \le \alpha_A \le \alpha_{pq}^T(t_0) \cup \alpha_{pq}^T(t_0) + \pi \le \alpha_A < \pi$

那么

$$\alpha_{pq}^T(t) = \alpha_{pq}^T(t_0) - \beta_{pq}^T(t) \tag{19}$$

如果 $-\pi \le \alpha_{pq}^T(t_0) < 0$，$\alpha_{pq}^T(t_0) \le \alpha_A \le \alpha_{pq}^T(t_0) + \pi$，那么

$$\alpha_{pq}^T(t) = \alpha_{pq}^T(t_0) + \beta_{pq}^T(t) \tag{20}$$

b）如果

$0 \le \alpha_{pq}^T(t_0) < \pi, -\pi \le \alpha_A \le \alpha_{pq}^T(t_0) \cup \alpha_{pq}^T(t_0) + \pi \le \alpha_A < \pi$，

那么

$$\alpha_{pq}^T(t) = \alpha_{pq}^T(t_0) + \beta_{pq}^T(t) \tag{21}$$

如果 $0 \le \alpha_{pq}^T(t_0) < \pi$，$\alpha_{pq}^T(t_0) \le \alpha_A \le \alpha_{pq}^T(t_0) + \pi$，那么

$$\alpha_{pq}^T(t) = \alpha_{pq}^T(t_0) - \beta_{pq}^T(t) \tag{22}$$

其中:

$$\beta_{pq}^T(t) = \arccos\frac{D_{BS}^T(t_0) + v_1 t\cos\left(\alpha_{pq}^T(t_0) - \alpha_A\right)}{\sqrt{\left(D_{BS}^T(t_0)\right)^2 + (v_1 t)^2 + 2D_{BS}^T(t_0) v_1 t\cos\left(\alpha_{pq}^T(t_0) - \alpha_A\right)}} \tag{23}$$

2.5　时变 AoA

a）如果

$-\pi \le \alpha_{pq}^R(t_0) < 0, -\pi \le \alpha_v \le \alpha_{pq}^R(t_0) \cup \pi + \alpha_{pq}^R(t_0) \le \alpha_v < \pi$，

那么

$$\alpha_{pq}^R(t) = \alpha_v - \beta_{pq}^R(t) \pm \pi \tag{24}$$

如果 $-\pi \le \alpha_{pq}^R(t_0) < 0$，$\alpha_{pq}^R(t_0) \le \alpha_v < \pi + \alpha_{pq}^R(t_0)$，那么

$$\alpha_{pq}^R(t) = \alpha_v + \beta_{pq}^R(t) \pm \pi \tag{25}$$

b）如果

$0 \le \alpha_{pq}^R(t_0) < \pi, -\pi \le \alpha_v \le \alpha_{pq}^R(t_0) \cup \pi + \alpha_{pq}^R(t_0) \le \alpha_v < \pi$，

那么

$$\alpha_{pq}^R(t) = \alpha_v + \beta_{pq}^R(t) \pm \pi \tag{26}$$

如果 $0 \le \alpha_{pq}^R(t_0) < \pi$，$\alpha_{pq}^R(t_0) - \pi \le \alpha_v < \alpha_{pq}^R(t_0)$，那么

$$\alpha_{pq}^R(t) = \alpha_v - \beta_{pq}^R(t) \pm \pi \tag{27}$$

其中

$$\beta_{pq}^R(t) = \arccos\frac{vt - D_{MS}^R(t_0)\cos\left(\alpha_v - \alpha_{pq}^R(t_0)\right)}{\sqrt{\left(D_{MS}^R(t_0)\right)^2 + (vt)^2 - 2D_{MS}^R(t_0) vt\cos\left(\alpha_v - \alpha_{pq}^R(t_0)\right)}} \tag{28}$$

应当注意，式(24)~(27)中的“$\pm\pi$”是校正器，以确保结果在范围 $[-\pi, \pi)$。

3　统计性质

3.1　时变空时域互相关函数

对于所提出的基于 IMT-A 信道建模系统，空间时变 CCF 不仅取决于 BS 处的天线间隔 $\Delta\delta_T$ 和 MS 处的天线间隔 $\Delta\delta_R$，还取决于时间 t。因此，该信道建模的空间 CCF 被称为局部空间 CCF，表示为[7]

$$\begin{aligned}&R_h(t, \Delta\delta_T, \Delta\delta_R) = \\ &(1/Q)\sum_{q=1}^{Q} E\left\{W_p(t) e^{jk\Delta\delta_T \sin\left(\alpha_{pq}^T(t)\right)} e^{jk\Delta\delta_R \sin\left(\alpha_{pq}^R(t)\right)}\right\}\end{aligned} \tag{29}$$

3.2 时变自相关函数

考虑到马尔可夫生灭过程，簇从 $t-\Delta t$ 到 t 存活的概率表示为 $R'=e^{-\rho_2(v_{MS}\Delta t+R_{MC}(v_1+v_P)\Delta t)}$ 。因此，第 p 个簇的非平稳信道模型的局部时间 ACF 可以表示为

$$r_n(t,\Delta t)=E\{h_p(t)h^*_p(t)\}= R'\times(1/Q)\sum_{q=1}^{Q}E\{W_p(t)X(t,\Delta t)Y(t,\Delta t)Z(t,\Delta t)\} \tag{30}$$

其中:

$$X(t,\Delta t)=e^{jk\delta_R\sin(\alpha_{pq}^R(t))-\sin(\alpha_{pq}^R(t+\Delta t))} \tag{31a}$$

$$Y(t,\Delta t)=e^{jk\delta_T\sin(\alpha_{pq}^T(t))-\sin(\alpha_{pq}^T(t+\Delta t))} \tag{31b}$$

$$Z(t,\Delta t)=e^{-jkv\cos(\alpha_{pq}^R(t)-\alpha_v)(t)}\times e^{jkv\cos(\alpha_{pq}^R(t+\Delta t)-\alpha_v)(t+\Delta t)} \tag{31c}$$

3.3 平稳间隔

可以使用平均功率延迟分布(APDP)计算平稳间隔，表示为

$$\bar{W}_h(t,\Delta t)=\frac{\sum_k^{k+N-1}|h(t_k,\tau)|^2}{N} \tag{32}$$

其中: $h(t_k,\tau)=\sum_{p=1}^{P}h_p(t_k)\delta(\tau-\tau_p)$ ，N 是要平均的功率延迟分布的数量， t_k 是第 k 个下降的时间。两个 APDP 之间的相关系数可以计算为

$$l(t_k,\Delta t)=\frac{\int\bar{W}_h(t_k,\tau)\bar{W}_h(t_k+\Delta t,\tau)d\tau}{\max\left\{\int\bar{W}_h(t_k,\tau)^2d\tau,\int\bar{W}_h(t_k+\Delta t,\tau)^2d\tau\right\}} \tag{33}$$

然后将平稳间隔计算为

$$T_h(t_k)=\max\{\Delta t\,|_{l(t_k,\Delta t)\geq l'}\} \tag{34}$$

其中 l' 是相关系数的给定阈值，具体值将在后面的仿真中给出。

4 仿真分析

接下来对所提出的高铁移动通信场景下的基于 IMT-A 信道建模的统计性质进行 MATLAB 仿真分析。

4.1 时变空时域互相关函数

在这里，本文使用 NLoS 的 UMA 场景和主要仿真参数如下：$\alpha_{pq}^T(t_0)=\text{random}$，$D_{BS}^T(t_0)=100$，$\alpha_1=15^o$，$v_1=30\text{m/s}$，$\alpha_{pq}^R(t_0)=\text{random}$， $D_{MS}^R(t_0)=150\text{m}$，$v=20\text{m/s}$ ， $\alpha_v=120^o$。

图 4 展示了所提出的基于 IMT-A 信道建模的三维(3D)局部空间 CCF 的绝对值。从图 4 可以看出，随着 MS 处的天线间距 $\Delta\delta_R$ 的逐渐增大，局部空间互相关函数 CCF 呈现下降趋势，并且是伴随着有一定周期性波动的下降形式，波动的幅度也随着 MS 处的天线间隔的增大而明显减小，最后趋近于平缓。这是由于该高速移动下的信道的非平稳特性引起的。

图 5 表示从图 4 截取的 5 个不同瞬时即 t=0s、t=1s、t=2s、t=3s、t=4s 的局部空间互相关函数的绝对值。

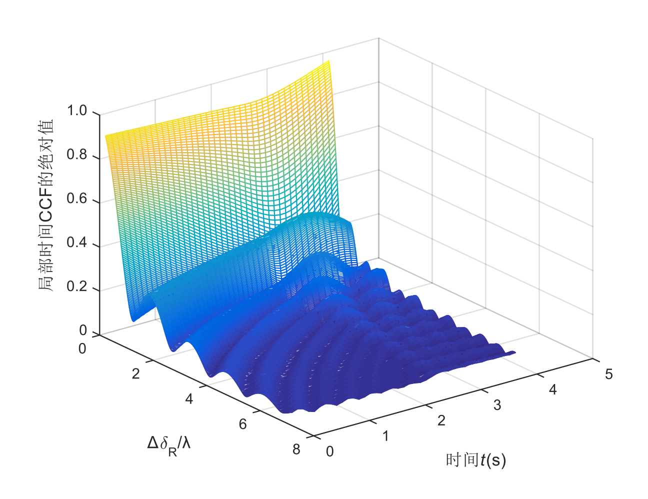


图 4 所提出的基于 IMT-A 信道建模的三维局部空间 CCF 绝对值

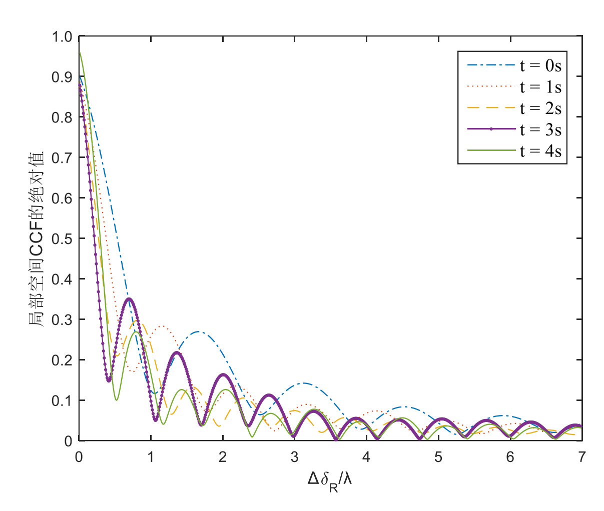


图 5 不同瞬时的局部空间 CCF 的绝对值

从图中可以看出，虽然局部空间 CCF 是随着 MS 处的天线间距的增大而下降，但是在不同的时刻，波动的幅度并不相同。总的来看，CCF 峰值整体是平缓略有增加的趋势，并且时间越长幅度越小，最后波动趋向于平缓。以上正是由于非平稳性引起的。结合图 4 和 5 的分析，表明该高速移动下基于 IMT-A 的信道模型有很明显的非平稳性。

4.2 时变自相关函数

继续使用 NLoS 的 UMA 场景进行仿真，以下参数用于仿真局部时间自相关函数 ACF：$\alpha_{pq}^T(t_0)=\text{random}$，$D_{BS}^T(t_0)=100$，$\alpha_1=15^o$， $v_1=30\text{m/s}$， $\alpha_{pq}^R(t_0)=\text{random}$， $D_{MS}^R(t_0)=70\text{m}$， $\alpha_v=-140^o$， $v_P=5\text{m/s}$， $\alpha_{MS}=120^o$， $v_{MS}=20\text{m/s}$。

图 6 表示 NLoS UMA 场景的基于 IMT-A 信道建模的 3D 局部时间自相关函数的绝对值。类似于局部空间互相关函数，由于时变 AoD 和 AoA，局部时间自相关函数的绝对值随时间 t 变化。随着时间差的逐渐增大，局部时间自相关函数 ACF 呈现下降趋势，并且有一定周期性波动的下降形式，波动的幅度也随着时间差的增大而明显减小，最后趋近于平缓。

图 7 表示从图 6 截取的 6 个不同瞬时即 t=0s、t=1s、t=2s、

t=3s、t=4s 和 t=5s 的局部时间自相关函数 ACF 的绝对值。本文可以看出，局部时间自相关函数是随着时间差的增大而下降，并且在不同的时刻，波动的幅度并不相同。并且有随着时间的增大，波动有变大的趋势。在时间差为 0.25s 时，不同的时刻的 ACF 基本都急剧下降了 80%以上。随着时间差的增大，波动趋向于平缓。从图 6 和 7 同样证实了该高速移动下基于 IMT-A 信道模型的非平稳性，仿真结果再次匹配了分析结果。

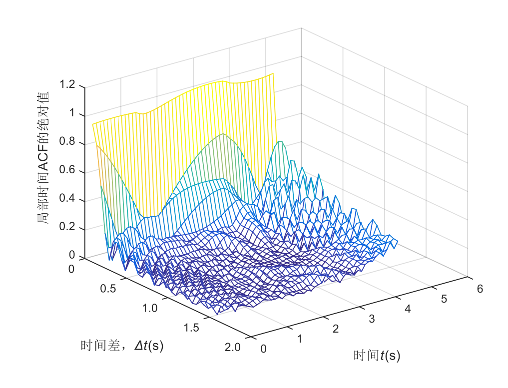


图 6 基于 IMT-A 信道建模的三维局部时间 ACF 绝对值

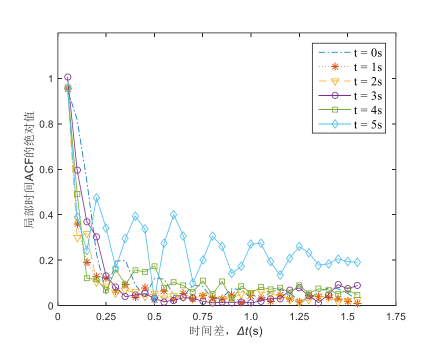


图 7 不同瞬时的局部时间 ACF 的绝对值

4.3 平稳间隔

图 8 显示了该基于 IMT-A 信道建模中速度为 v=90m/s 和速度为 v=20m/s 时的平稳间隔的经验补充累积分布函数(CCDF)[10]的结果图，其他的仿真参数为：f_c =930 MHz，l' =0.8。对于该信道建模，$D_{BS}^{T}(t_0)$ =100，v_1 =0m/s，$D_{MS}^{R}(t_0)$ =70m，α_v =0°。

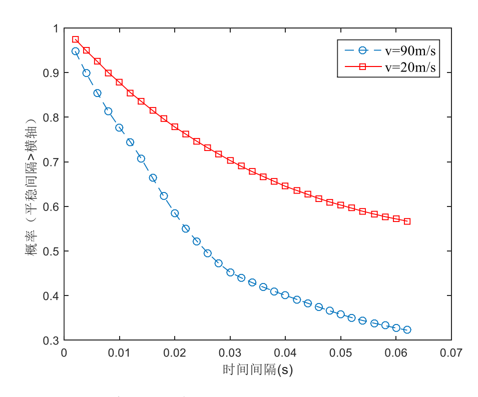


图 8 速度分别为 v=90m/s 和 v=20m/s 的 CCDF

从图 8 可得，速度为 v=90m/s 时，本文所提出的信道建模的平稳间隔的 CCDF 概率如下：当概率为 0.8 时对应的时间间隔为 0.009s ，以及概率为 0.6 时对应的时间间隔为 0.02s；速度为 v=20m/s 时，其平稳间隔的 CCDF 的情况是：当概率为 0.8 时对应的时间间隔为 0.018s，以及概率为 0.6 时对应的时间间隔为 0.06s。通过以上两者数据的对比可以看出，速度越大时，相关性越小，从而证明了所提出的基于 IMT-A 的信道建模方法的可行性，符合客观实际情况。

5 结束语

本文提出了一种高速铁路移动通信场景下基于 IMT-A 信道的建模方法，使用马尔可夫过程建模时变簇的生灭过程，并基于此信道模型，推导和分析了其重要的统计特性，即局部空间 CCF 和局部时间 ACF 及平稳间隔。对该信道建模中的 CCF、ACF 和平稳间隔的 MATLAB 进行了仿真，发现其具有非平稳特性，验证了本文所提信道建模方法的可行性。

参考文献：

[1] ITU-R M. 2135-1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced [EB/OL]. 2009. http://ccsa. org. cn.

[2] Yang J, Ai B, Guan K, et al. Quasi-stationarity regions analysis for channel in composite high-speed railway scenario [C]// Proc of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. 2016: 1699-1700.

[3] Lin S, Kong L, He L, et al. Finite-state Markov modeling for high-speed railway fading channels [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 954-957.

[4] Matolak D W. V2V communication channels: state of knowledge, new results, and what's next [M]// Communication Technologies for Vehicles. Berlin: Springer, 2013: 1-21.

[5] Xuan L, Chao S, Ai B, et al. Finite-state Markov modeling of fading channels: a field measurement in high-speed railways [C]// Proc of IEEE//CIC International Conference on Communications in China. 2013: 577-582.

[6] Molisch A F, Tufvesson F. Propagation channel models for next-generation wireless communications systems [J]. IEICE Trans on Communications, 2014, E97. B (10): 2022-2034.

[7] Wu S, Wang C X, Haas H, et al. A Non-Stationary Wideband Channel Model for Massive MIMO Communication Systems [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2015, 14 (3): 1434-1446.

[8] Molisch A F, Karttunen A, Hur S, et al. Spatially consistent pathloss modeling for millimeter-wave channels in urban environments [C]// Proc of European Conference on Antennas and Propagation. 2016: 1-5.

[9] Wu S, Wang C X, Aggoune E H M, et al. A non-stationary 3-D wideband twin-cluster model for 5G massive MIMO channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32 (6): 1207-1218.

[10] Guan K, Ai B, Fricke A, et al. Excess propagation loss modeling of semiclosed obstacles for intelligent transportation system [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17 (8): 2171-2181.